

МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.С. Дмитриев, Т.Г. Костюченко, В.А. Скрипняк*

Томский политехнический университет

*Томский государственный университет

E-mail: dtps@tcg.tpu.ru

Приводятся результаты механического анализа конструкции исполнительного органа системы ориентации космического аппарата. Экспериментальная проверка результатов расчета показала хорошую степень достоверности моделей, имитирующих работу прибора.

Исполнительные органы (ИО) на базе силовых гироскопов или управляемых по скорости двигателей-маховиков применяются для управления ориентацией длительно существующих маневренных космических аппаратов (КА), для которых кинетический момент измеряется в диапазоне от 1 до 50 Нмс [1].

По мере развития космической техники постоянно растут требования к системам ориентации, и, соответственно, к исполнительным органам, совершенствуются технологии их проектирования и расчета. Поэтому одним из основных требований при разработке исполнительных органов систем ориентации (СО) космических аппаратов является проведение механического анализа конструкции [2, 3].

Механический анализ — это прочностной анализ конструкции методом конечных элементов, наиболее распространенным и эффективным на сегодняшний день методом прочностного расчета.

Работа предусматривала создание математической конечно-элементной модели и проведение механического анализа конструкции исполнительного органа, состоящего из блока механики (БМ) и блока автоматики (БА). Было предусмотрено проведение механического анализа как отдельно для БМ и БА, так и для всего прибора в сборе.

Механический анализ включает в себя [4, 5]:

- создание математической конечно-элементной модели конструкции прибора (трехмерная геометрическая модель, конечно-элементная модель, модель механического поведения материалов, из которых изготовлены элементы конструкции);
- непосредственно проведение механического анализа, который включает в себя определение собственных частот и форм колебаний, расчет критических случаев нагружения, анализ механического поведения элементов конструкции.

Первым этапом работы было создание трехмерной геометрической модели конструкции БМ и БА. Это осуществлялось с использованием программных продуктов T-Flex CAD 3D и ANSYS. Необходимо отметить сложность геометрических форм БМ и БА, особенно БМ, имеющих множество мелких деталей, фасок, выемок и тому подобных «мелочей». Поэтому построение 3D-моделей оказалось непростой и трудоемкой процедурой.

На *втором этапе* при создании конечно-элементной модели конструкция представляется в виде совокупности конечных элементов. Математические задачи о деформации тела под воздействием механических нагрузок, синусоидальных нагрузок, об определении частот собственных колебаний и т.п. решаются на основе дискретного представления тела с помощью конечных элементов. Получаемые численные решения зависят от того, насколько адекватно выполнено представление тела конечными элементами.

При создании конечно-элементных моделей конструктивных элементов БМ и БА использовались тетрагональные 10-узловые конечные элементы типа Solid-187.

При выполнении механического анализа проводился анализ сходимости численных результатов при различных способах представления элементов конструкций в виде конечных элементов. «Истинным» считался результат, соответствующий конечно-элементной модели с максимальным числом конечных элементов, уменьшение которого приводит к изменению основных значений расчетных параметров не более чем на 1...2 %.

На рис. 1 приведены конечно-элементные модели основных элементов конструкций БМ и БА.

Третьим этапом было создание модели механического поведения материалов, из которых изготовлены элементы конструкции.

В табл. 1 приведены принятые значения основных параметров, характеризующие свойства этих материалов.

Первой и основной процедурой механического анализа, без которой невозможно проведение других видов анализа, является модальный анализ, который предназначен для определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкций. Знание собственных частот необходимо при конструировании деталей и узлов, чтобы избежать их возбуждения на одной из собственных частот в процессе эксплуатации.

Модальный анализ проводился как для отдельных конструктивных элементов БМ и БА, так и для блоков в сборе.

В табл. 2 и 3 приведены расчетные собственные частоты колебаний для элементов конструкции БМ и БА и блоков в сборе.

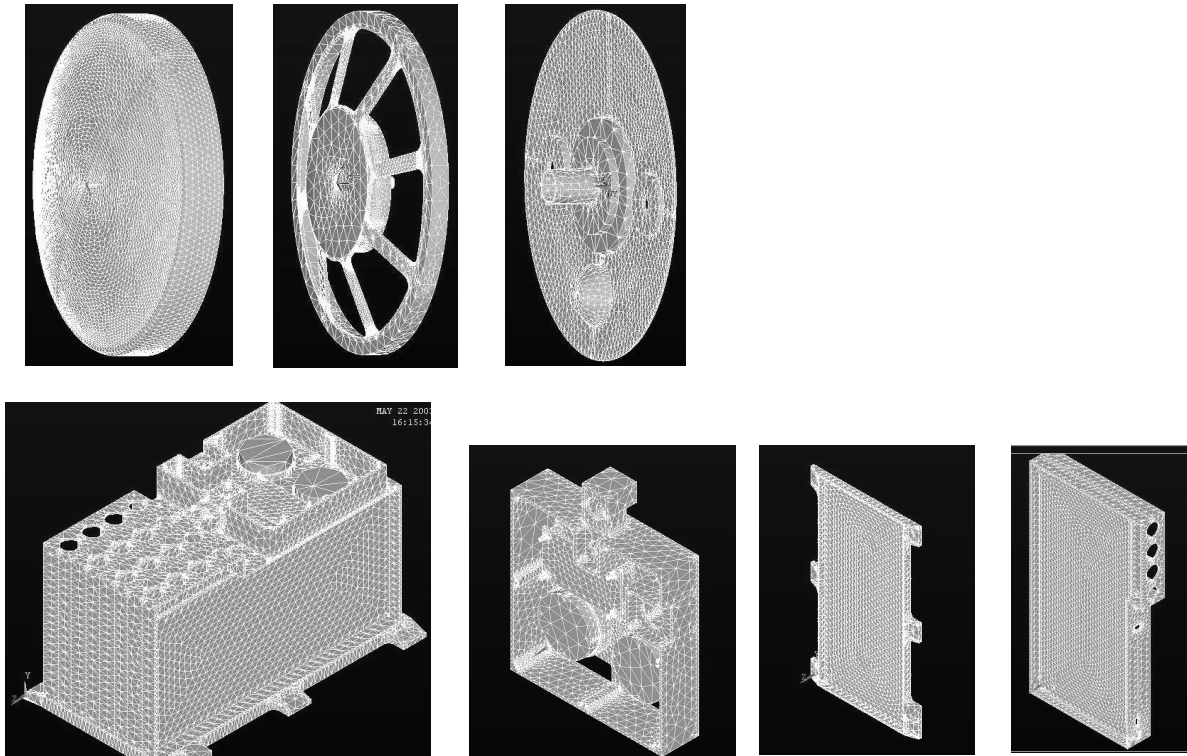


Рис. 1. Конечно-элементные модели основных конструктивных элементов БМ и БА

Таблица 1. Принятые значения параметров материалов

Материал	Сталь 20Х13 ГОСТ 5949-75	Магний МА2-1 ГОСТ 21990-76	Алюминиевый сплав АмцМ-1 ГОСТ 21631-76	Алюминиевый сплав АМг2 ГОСТ 21631-76
Массовая плотность, кг/м³	7850	1790	2700	2700
Модуль Юнга, ГПа	20,7	41,0	73,0	73,0
Коэффициент Пуассона	0,29	–	0,33	0,33
Коэффициент линейного расширения, К ⁻¹	1,51·10 ⁻⁵	2,60·10 ⁻⁵	2,43·10 ⁻⁵	2,43·10 ⁻⁵
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	419	1100	963	963
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	46,7	69,1	156,0	156,0

Таблица 2. Расчетные собственные частоты колебаний для БМ, Гц

Номер моды	БМ	Маховик	Корпус основания	Кожух
1	156,11	138,17	709,83	1403,3
2	164,43	138,69	720,14	1702,3
3	218,72	289,41	734,58	1702,8
4	389,85	424,07	–	1763,5
5	390,85	425,84	–	–
6	579,67	–	–	–
7	583,56	–	–	–
8	1104,2	–	–	–
9	1122,6	–	–	–

Таблица 3. Расчетные собственные частоты колебаний для БА, Гц

Номер моды	БА	Основание КУ	Фильтр	Основание
1	429,16	108,59	295,08	609,66
2	862,44	108,59	303,04	762,48
3	926,75	142,27	364,81	1156,1
4	938,20	142,28	420,03	1416,6
5	944,92	301,59	507,05	1605,8
6	961,00	301,60	541,31	1659,8
7	1255,9	310,54	687,11	1803,5
8	1289,3	310,57	694,94	–
9	1311,8	518,28	736,67	–

На рис. 2, 3 в качестве примеров приведены формы колебаний и перемещения на разных модах для отдельных элементов конструкции БМ и БА.

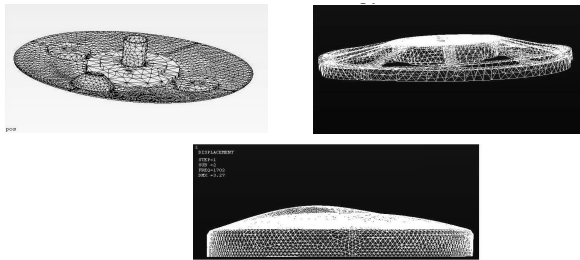


Рис. 2. Формы колебаний и перемещения на разных модах элементов конструкции БМ

Анализ механического поведения конструкции БМ и БА при воздействии случайных колебаний проводился в рамках спектрального анализа методом случайной вибрации.

В конструкции БМ напряженно-деформированное состояние возникает в местах присоединения спиц маховика.

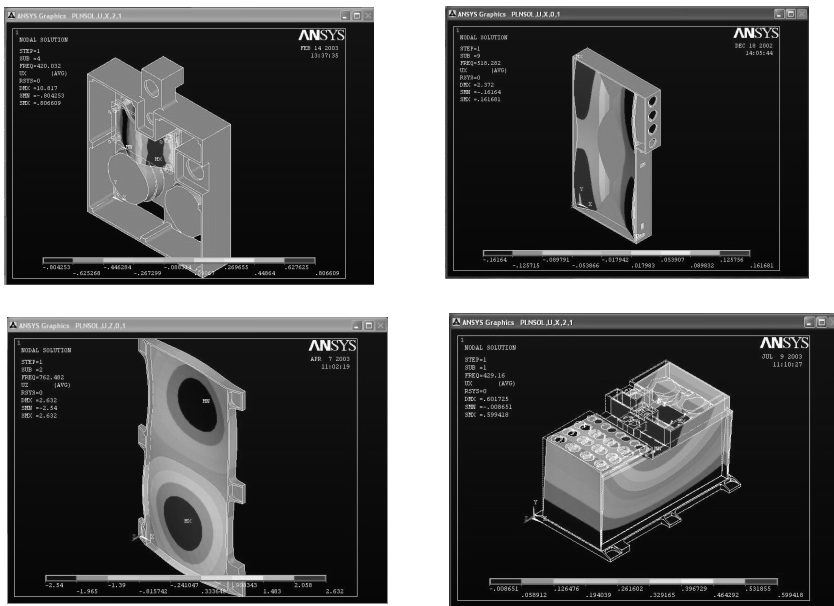


Рис. 3. Формы колебаний и перемещения на разных модах элементов конструкции БА

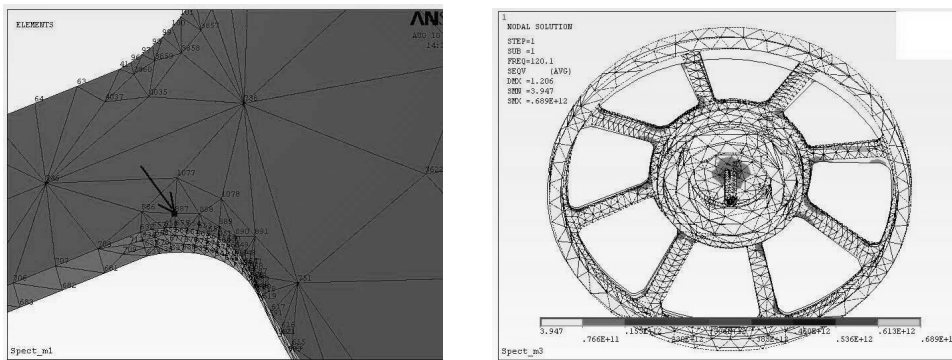


Рис. 4. Интенсивность напряжений и распределение сдвиговых напряжений

На рис. 4 показана интенсивность напряжений (критерий Мизеса) в области узлов, указанных стрелкой, и распределение сдвиговых напряжений при совпадении собственных частот колебаний для одной из мод.

Гармонический анализ проводился как для элементов конструкций БМ и БА, так и для блоков в сборе.

Для примера взяты перегрузки в 20 g при частоте 20 Гц для маховика.

При перегрузках 20 g максимальные расчетные значения интенсивности сдвиговых напряжений при частоте 20 Гц в области крепления маховика к

валу составляют 1930 МПа. Коэффициент безопасности при этом $< 1,25$. В случае возникновения в реальности воздействий с такими параметрами в конструкции маховика могут возникнуть остаточные деформации, что приведет к прекращению нормального функционирования БМ.

Соответствующие деформации по разным осям показаны на рис. 5.

У БА при синусоидальных воздействиях с уровнем 15 g выявлены превышения расчетных напряжений над допустимыми, при этом максимальные смещения в фильтре – 25, в основании – 1, в БА – 9 мм.



Рис. 5. Деформации конструкции маховика по разным осям при гармоническом анализе

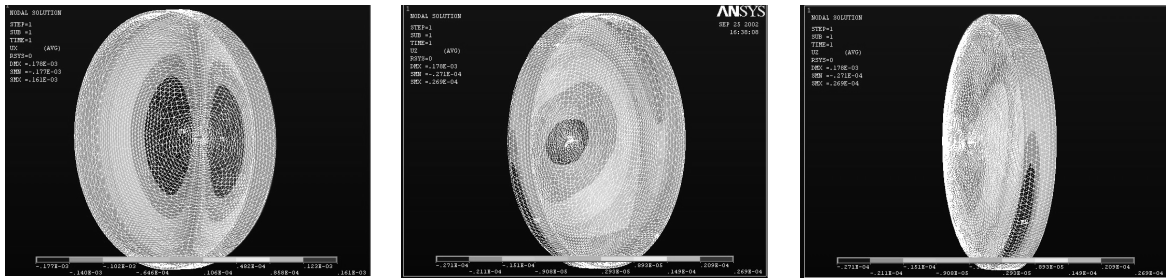


Рис. 6. Смещения в коже при максимальных нагрузках

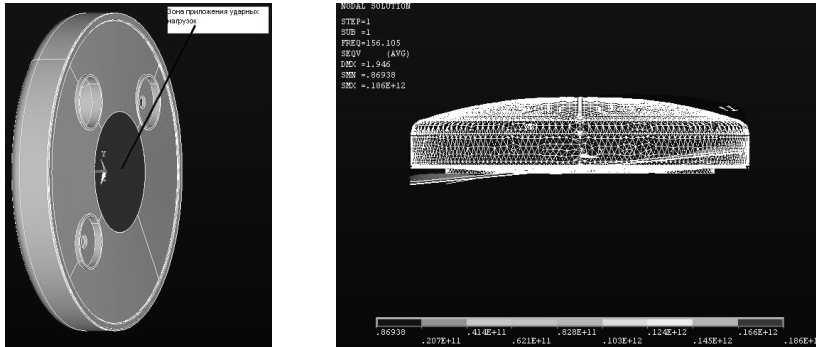


Рис. 7. Деформация БМ при ударных нагрузках

Анализ устойчивости конструкции (статический анализ), выполнялся для определения деформации кожных прибора для критического случая — максимального давления $1,1 \cdot 10^5$ Па. Расчетный коэффициент безопасности получился 1,22; нормативный — 1,25.

На рис. 6 — результаты расчетов смещений в коже при максимальном давлении по осям X, Y, Z. Кожух находится в устойчивом состоянии, но дальнейшее повышение напряжений может привести к потере устойчивости.

Тепловой анализ (термо-прочностной) проводился для БМ с целью определения наличия или отсутствия заклинивания подшипников в заданном диапазоне температур. Смещение конструкции в диапазоне температур от -20 до $+75$ °C составляет $4,4 \cdot 10^{-2}$ мм, что не приводит к заклиниванию подшипников.

Конструкции БМ и БА исследовались на удар.

На рис. 7 показана деформация модели БМ при ударных нагрузках в поддиапазоне частот 35...50 Гц и амплитудах виброускорений 25...50 g. Деформация кожных БМ обусловлена неравномерным распределением массы на основании БМ. Эти расчеты свидетельствуют о недостаточной жесткости пластины-основания.

Для БА ударные нагрузки на конструкцию намного превышают безопасный порог и не поддаются анализу.

В рамках этой работы была проведена экспериментальная проверка результатов расчетов, полученных при механическом анализе конструкции прибора.

Элементы конструкции и виды воздействий для экспериментальной проверки определялись заказчиком. Для экспериментальной проверки были выбраны собственные частоты маховика, устойчивость конструкции гермокожуха, и проверено поведение конструкции при тепловом воздействии.

Экспериментальное определение собственных частот колебаний маховика показало, что отличие на первой моде составило 2,3 %.

Экспериментальная проверка устойчивости конструкции гермокожуха заключалась в испытаниях кожных при давлении 1200 ГПа (по техническому заданию — 1100 ГПа) в течение 5 мин, после чего кожных сохранил свою форму. Измерения размеров кожных после испытаний не выявили остаточных деформаций.

Экспериментальная проверка поведения конструкции БМ при тепловом воздействии показала следующее. Результаты измерений момента сопротивления свидетельствовали о том, что конструкция БМ в диапазоне температур, заданных техническим заданием, нормально функционирует, отсутствует заклинивание подшипников как в зоне активных частот вентильного двигателя и датчика положения ротора, так и в шарикоподшипниковой опоре.

Сравнение результатов, полученных в эксперименте, с результатами расчетов с использованием разработанных моделей показало, что модели имеют достаточно хорошую степень достоверности и могут быть использованы в дальнейшем для различного вида прочностных анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев В.С., Гладышев Г.Н., Лянзбург В.П., Чернышев А.И. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов на базе управляемых по скорости двигателей-маховиков // В сб. трудов Всеросс. электротехнического конгресса с международным участием. – М., 2000.
2. Дмитриев В.С., Костюченко Т.Г. Автоматизация проектирования исполнительных органов систем ориентации космических аппаратов // Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения: Сб. докл. технологического конгресса. – Омск, 2001. – С. 143–146.
3. Dmitriev V.S., Kostuchenko T.G. Concept of automation design and preparing production of orientation system actuator of space devices based on T-flex programme product // 5th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS 2001). – June 26–July 3, 2001, Tomsk. – P. 23–25.
4. Дмитриев В.С., Костюченко Т.Г., Скрипняк В.А. Механический анализ маховика исполнительного органа космического аппарата // Современные проблемы машиностроения и приборостроения: Сб. трудов I Междунар. конф. – Томск, 24–28 сент. 2002. – С. 84–85.
5. Dmitriev V.S., Kostuchenko T.G., Skripnyak V.A. Analysis of germ-casing construction stability of spacecraft actuator // 8th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS 2004). – June 26–July 3, Tomsk, 2004. – V. 3. – P. 27–29.

УДК 629.782.05:629.783

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЯ МОМЕНТОВ ГИРОДИНОВ

А.Н. Гормаков, А.П. Михеев*

Томский политехнический университет

*НПЦ «Полус». г. Томск

E-mail: dtps@lcy.tpu.ru

Представлены результаты анализа возможности создания измерителя «возмущающих» моментов на посадочных местах исполнительных органов систем ориентации космических аппаратов. Приведено описание конструкции измерителя и его основные технические характеристики.

Введение

Управление ориентацией орбитальных станций и искусственных спутников Земли разного назначения осуществляется преимущественно с помощью активных систем ориентации, исполнительными органами которых являются управляемые по скорости двигатели-маховики (УДМ), гироскопы и двигатели-маховики в одноосном подвесе. Благодаря простоте конструкции и сравнительно невысокой стоимости наиболее широкое применение из перечисленных исполнительных органов нашли УДМ. Основными источниками возмущающих (нежелательных) моментов УДМ являются дисбаланс и упругие деформации ротора, а также погрешности изготовления подшипников ротора. Эти возмущающие моменты, особенно знакопеременные, изменяющиеся с частотой, близкой к собственной частоте космического аппарата (КА), могут вызвать резонанс, в результате чего снижается качество выполняемых КА задач. Поэтому на этапе разработки и в процессе контрольных испытаний необходимо контролировать возмущающие моменты УДМ на стенде – измерителе моментов [1–5].

Принципиальная схема измерителя моментов

Для упрощения конструкции электромеханического модуля (ЭММ) измерителя моментов (ИМ), повышения стабильности механических характеристик его элементов принято решение о создании

измерителя на базе одноосного подвеса. Измерение моментов, действующих вокруг трех осей ЭММ, осуществляется путем последовательного совмещения каждой из осей с измерительной осью ЭММ, измерением момента вокруг этой оси, переустановкой гироскопа на платформе с целью совмещения другой оси с измерительной осью ЭММ и т.д.

В данном измерителе моментов применен компенсационный принцип измерения. Стенд – измеритель моментов (рис. 1) состоит из платформы – 1, на которую устанавливается и закрепляется исследуемый исполнительный орган – 2. Платформа установлена в упругих опорах – 3 на основании – 4 и имеет возможность поворота вокруг оси АА подвеса. Угол поворота платформы измеряется посредством датчика угла – 5. Сигнал с датчика угла – 5, пропорциональный углу поворота платформы, поступает на усилительно-преобразующее устройство – 6 и далее на моментный двигатель – 7. Ток, протекающий по обмотке моментного двигателя, контролируется преобразователем ток – напряжение – 8. Измеряя этот ток, можно судить о моменте, создаваемом исследуемым исполнительным органом. Диапазон частот измеряемых знакопеременных моментов ограничен ед. Гц, что обусловлено инерционностью элементов системы силовой компенсации момента.

В состав ИМ входит управляющий компьютер – 10, источники питания – 12, цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи – 9, регистрирующие устройства – 11.